

## 8 NOTRE IMAGE DE L'UNIVERS

Il y a mille façons de raconter l'histoire des astres... les images de l'Univers pouvant être déclinées selon différents axes. Aussi, ce chapitre nous conduira-t-il successivement dans les dimensions géométrique, temporelle, et spectrale des images de l'Univers, aujourd'hui accessible grâce aux récents développements des outils d'observation de l'astronomie.

*La dimension géométrique* : De la taille humaine jusqu'aux amas de galaxies, un voyage à travers les échelles d'organisation de l'Univers nous fera découvrir différents domaines de structuration - formes, sphères, disques - selon les forces fondamentales dominantes.

*La dimension temporelle* : En astronomie, regarder loin c'est regarder dans le passé; l'observation de l'Univers lointain nous a ainsi révélé sa naissance violente. Commençant par ce Big Bang, nous suivrons la flèche du temps jusqu'à la formation de l'Univers actuel.

*La dimension spectrale* : Un panorama multi-longueurs d'onde, du domaine des ondes radio jusqu'aux rayons gamma, nous permettra de découvrir la voute célestes encore sous une nouvelle lumière...

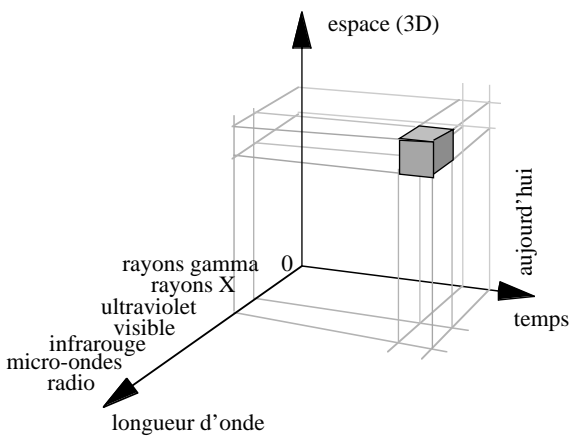
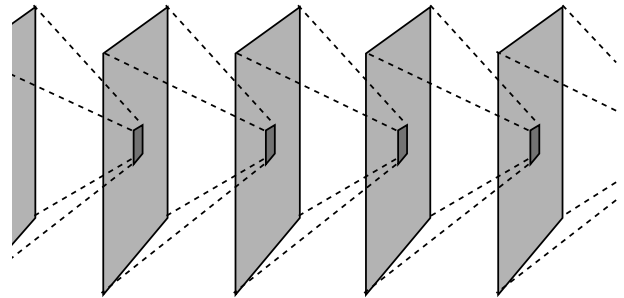


Fig 8.1 : Le monde physique décliné selon trois axes

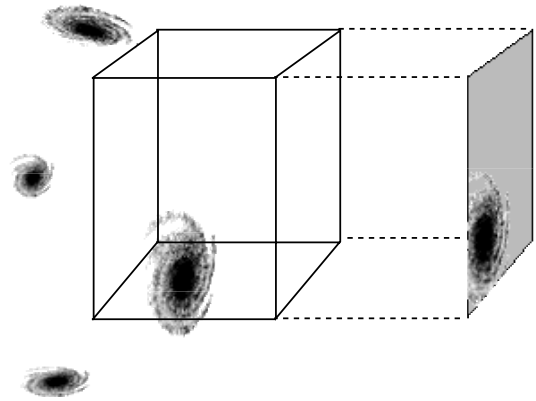
### 8.1 LA DIMENSION SPATIALE

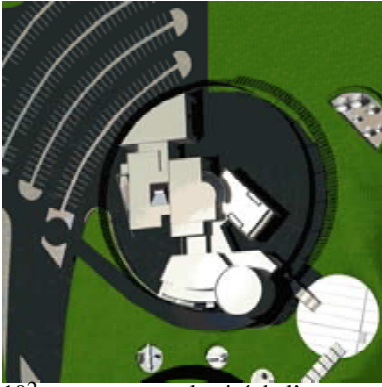
Chaque image de la Fig. 8.1 (double page suivante) comporte la représentation d'une partie de l'Univers dont la taille est 10 fois plus grande que celle de l'image précédente. Cette progression exponentielle par "puissance de 10" permet d'accéder, de façon intuitive, aux proportions de notre Univers et de comprendre l'hierarchie de ses structures.

Chaque image de la Fig. 8.1 (double page suivante) comporte la représentation d'une partie de l'Univers dont la taille est 10 fois plus grande que celle de l'image précédente. Cette progression exponentielle par "puissance de 10" permet d'accéder, de façon intuitive, aux proportions de notre Univers et de comprendre l'hierarchie de ses structures.



Les images correspondent à la projection d'un volume - c.a.d. : ne sont représentés que les objets contenus dans un cube imaginaire de dimension caractéristique à l'échelle de chaque image.

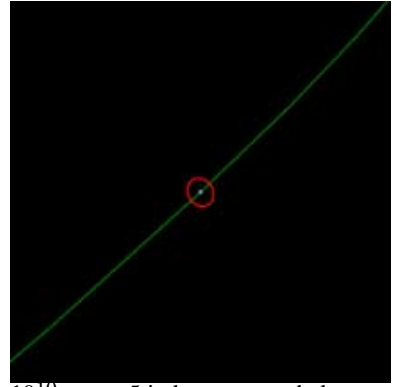




10<sup>2</sup> m : la cité de l'espace



10<sup>6</sup> m : l'Occitanie, les Pyrénées



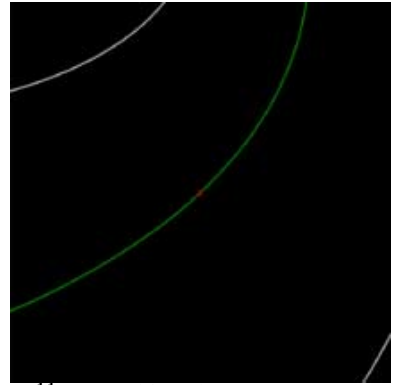
10<sup>10</sup> m : 5 j. du parcours de la terre



10<sup>3</sup> m : la vallée de l'Hers, Lasbordes



10<sup>7</sup> m : la Terre



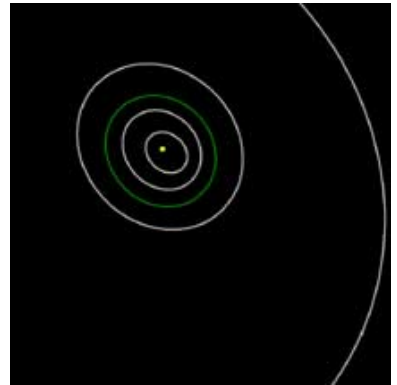
10<sup>11</sup> m : orbites de vénus, terre, mars



10<sup>4</sup> m : Toulouse



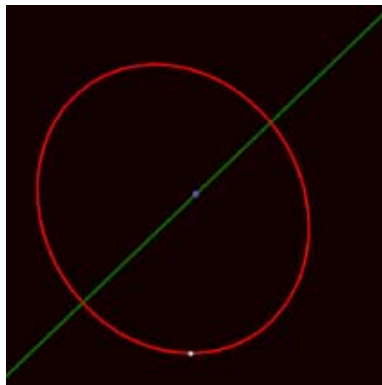
10<sup>8</sup> m : la Terre, son orbite



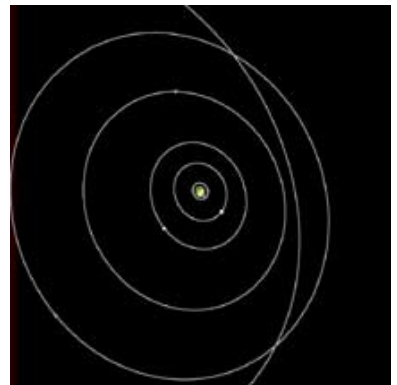
10<sup>12</sup> m : soleil, orbites de mercure, vénus, terre mars et ... jupiter



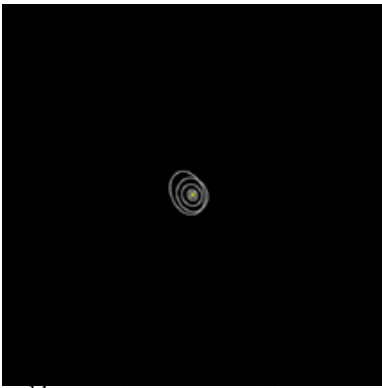
10<sup>5</sup> m : la région Toulousaine



10<sup>9</sup> m : l'orbite de la lune



10<sup>13</sup> m : orbites des planètes externes



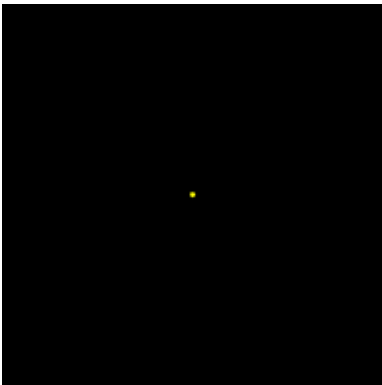
$10^{14}$  m : le système solaire



$10^{18}$  m : les étoiles proches



$10^{22}$  m : Galaxie et nuages



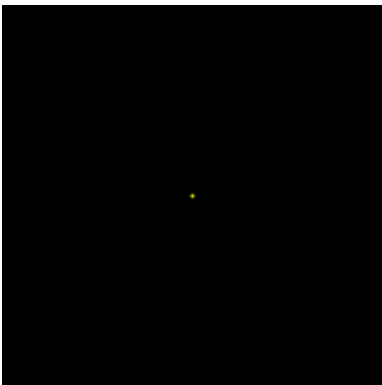
$10^{15}$  m : le soleil, seul dans ...



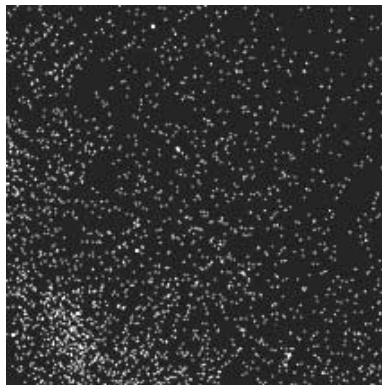
$10^{19}$  m : notre voisinage Galactique



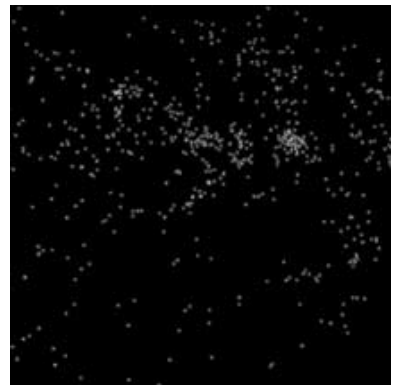
$10^{23}$  m : le groupe local



$10^{16}$  m (1 al) : ... un vaste espace vide



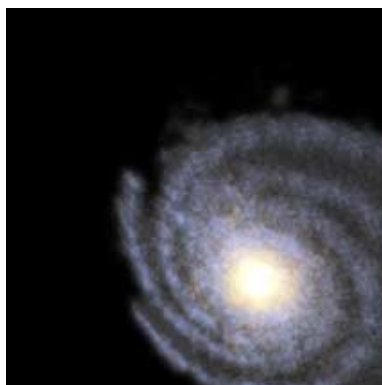
$10^{20}$  m : le bras local



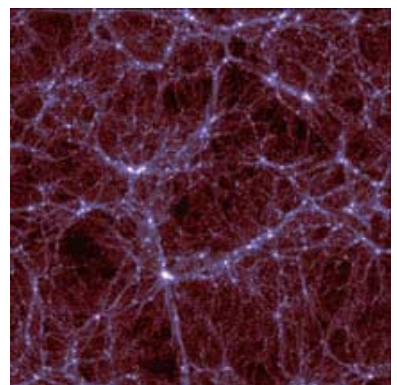
$10^{24}$  m : l'amas de Virgo



$10^{17}$  m : enfin -  $\alpha$  Centauri



$10^{21}$  m : la Galaxie



$10^{25}$  m : les grandes structures

## 8.2 L'ECHELLE DE TEMPS

Texte et storyboard du film "Univers - l'inimaginable naissance" de David Biau, Didier Gros Jean & Peter von Ballmoos.

Comment sont nés la Terre et le Ciel ? Que sont les étoiles ? Qu'est-ce qui nous relie au reste de l'Univers ?

Chaque civilisation a raconté l'histoire à sa façon. Et ces histoires étaient si belles qu'elles sont toujours vraies.

Avec les moyens de la science, l'Homme cherche toujours une réponse. Et un nouveau mythe commence à prendre forme. C'est une histoire à la démesure de son sujet, qui s'écrit et se réécrit sans cesse. Il n'est pas sûr qu'on puisse y mettre un jour un point final ; mais telle qu'elle est, on a déjà envie de la raconter...

"0"



Il y a quinze milliards d'années, ce qui allait devenir notre univers observable aujourd'hui était bien plus petit qu'un grain de sable.

En une fraction de secondes d'une expansion foudroyante, cela mesurait déjà des milliards de milliards de kilomètres.

10<sup>-4</sup> s  
à 1 s



La matière était incroyablement dense, mais elle voisinait avec une quantité équivalente d'antimatière.

Au gré des collisions, matière et antimatière se détruisaient dans un dégagement de lumière, de photons.

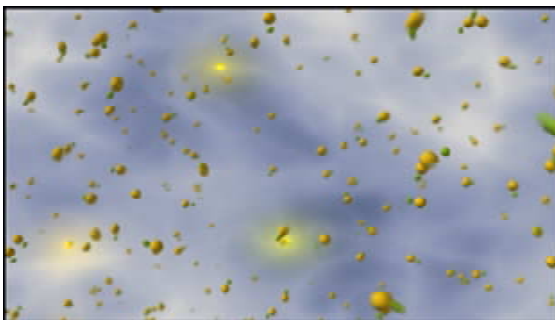
En un dix millièmes de seconde, il y eut un vainqueur à ce combat : une légère différence dans la façon de se désintégrer fit que l'antimatière disparut presque totalement et qu'une infime partie de la matière subsista. Heureusement pour nous, il en restait assez pour faire un univers.

3 min



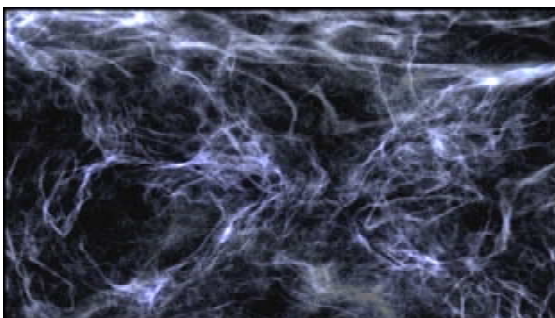
Il fallut trois minutes de plus pour que les composants des atomes apparaissent. Mais dans cette épaisse purée de matière à très haute température, les collisions étaient tellement fréquentes et violentes que les atomes n'avaient aucune chance de se former.

3·10<sup>5</sup>  
ans



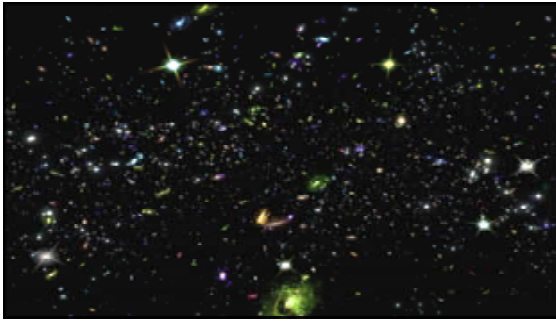
Cet univers incandescent continuait à grandir et la température à baisser. Au bout de 300 000 ans, les électrons purent enfin rester attachés à leur noyau : les atomes que nous connaissons étaient nés. Désormais, matière et lumière allaient vivre des existences séparées. L'univers devint transparent ; et les photons des origines se perdirent à ses confins, ultimes preuves de la violence des premiers instants.

1-2·10<sup>6</sup>  
ans



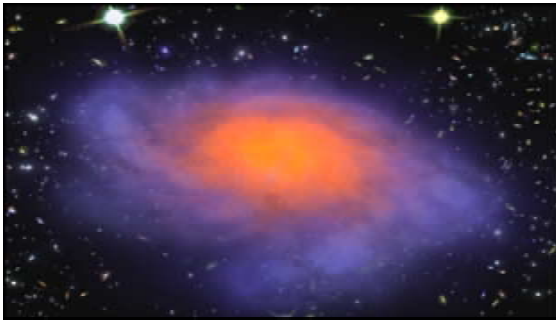
La matière n'était pas seule. Avec la mystérieuse matière noire qui compose aujourd'hui 90% de l'Univers, elle se soumit à un phénomène qui était resté discret jusqu'alors : la gravitation.

2·10<sup>6</sup>  
ans



Attiré par lui-même, ce mélange se condensa en filaments de plus en plus denses, composé de milliards de galaxies, isolées ou regroupées en amas.

~ 3·10<sup>9</sup>  
ans



Voici notre Galaxie, la Voie Lactée, avec ses 200 milliards d'étoiles... auxquelles s'ajoutent celles qui naissent encore tous les jours. 200 milliards de véritables bombes à hydrogène que leur propre gravité empêche d'éclater dans l'espace.

3·10<sup>9</sup> -  
10<sup>9</sup> ans



Mais comment ce monde gazeux, à base d'hydrogène et d'hélium finit-il par se peupler de planètes solides comme la Terre ?

C'est une histoire répétée à l'infini : à force de brûler sans compter ...

3·10<sup>9</sup> -  
10<sup>9</sup> ans



... une étoile massive se met à fabriquer des sous-produits comme l'oxygène, le carbone ou le fer.

En quelques millions d'années, cet astre dont le diamètre est de plusieurs fois la distance Terre-Soleil tombe à court de combustible.

3·10<sup>9</sup> -  
10<sup>9</sup> ans

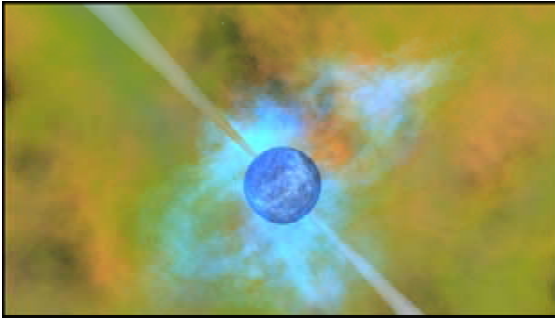


En quelques secondes, le noyau s'effondre.

L'enveloppe extérieure, elle, est éjectée dans l'espace, sous la forme d'un nuage de gaz.

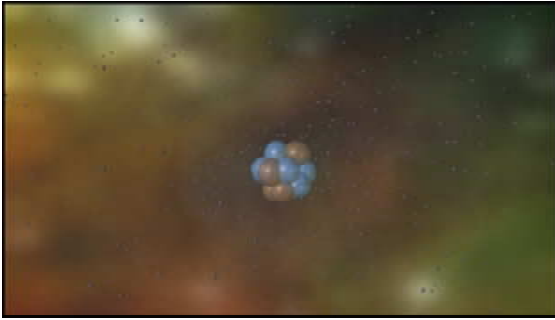
Pendant des semaines, des mois, cette supernova brille comme des milliards de soleils.

$3 \cdot 10^9 - 10^9$  ans



Au centre de l'explosion, il ne subsiste plus qu'un « cadavre stellaire », une étoile à neutrons d'une dizaine de kilomètres de diamètre, en rotation rapide.

$3 \cdot 10^9 - 10^9$  ans



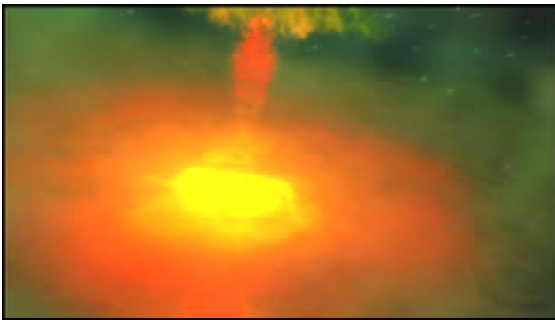
Par le matériel éjecté, la supernova ensemece l'univers de ses nouveaux éléments qui finissent par s'intégrer dans le nuage de gaz et de poussière d'une nébuleuse...

$10^{10}$  ans



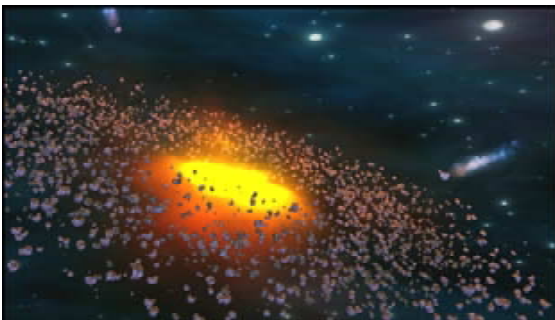
Ces nébuleuses sont les pouponnières des étoiles : Par endroits, si la température n'est pas trop élevée, ce nuage moléculaire principalement constitué d'hydrogène, se contracte sous l'effet de la gravitation.

$10 \cdot 10^9$  ans



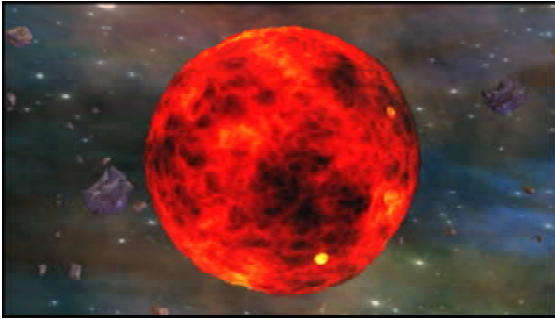
Il se transforme durant quelques millions d'années en une boule incandescente de faible masse, comme notre soleil ...

$10.3 \cdot 10^9$  ans



... entourée de matière qui finit elle-même par se condenser en planètes comme la Terre...

10.4-10<sup>9</sup>  
ans



Notre planète s'est formée il y a 4 milliards 600 millions d'années, dans un gigantesque nuage de gaz et de poussières, qui s'est combiné en agrégats de plus en plus massifs sous l'effet de la gravitation. Sur ce monde premier, la température de surface est de plusieurs milliers de degrés.

Ici règne la loi du plus lourd. C'est la gravitation qui ordonne les matériaux assemblés par le hasard. D'abord un cœur de fer en fusion, puis un épais manteau de minéraux moins lourds, et enfin une croûte légère, bombardée de météorites, qui cède de toutes parts sous la pression de la lave et des gaz.

11-10<sup>9</sup>  
ans



Bombardée de météorites, secouée par son volcanisme, la Terre est enveloppée d'une atmosphère riche en vapeur d'eau et en dioxyde de carbone. Comme des radeaux soumis aux caprices de courants venus des profondeurs, les futurs continents voyagent, se disloquent, se ressoldent. Les volcans crachent du méthane, de l'ammoniac, du gaz carbonique. L'atmosphère est opaque, chargée de poussières.

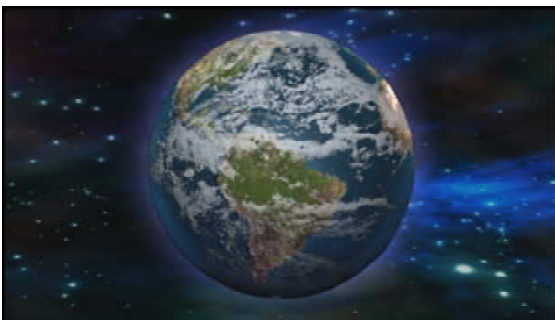
Avec la baisse progressive de la température, un déluge de plusieurs millions d'années de déclanche. Mais la Planète Bleue n'est pas encore bleue. Sous son atmosphère primitive, les océans tout neufs se colorent en rose ...

12-10<sup>9</sup>  
ans



Imaginez une éprouvette de plusieurs milliards de litres d'eau chaude et acide, remplie des composants chimiques les plus variés. Avec le Hasard pour chef de laboratoire, le Temps pour assistant, et avec le concours des rayonnements solaires et de l'énergie de la foudre, la vie fait son apparition sur Terre. Des molécules de plus en plus complexes finissent par s'assembler dans des bouillons d'écume jusqu'à former ce qui, bien plus tard, prendrait le nom d'« acide désoxyribonucléique » ou ADN. Les bactéries puis les algues absorbent le gaz carbonique et restituent de l'oxygène. En altitude se forme la couche d'ozone, un bouclier protecteur qui repousse les rayons ultraviolets. Sur cette planète bleue, les continents s'ouvrent enfin aux êtres vivants : après mille tentatives avortées, les animaux prennent enfin pied sur la terre ferme.

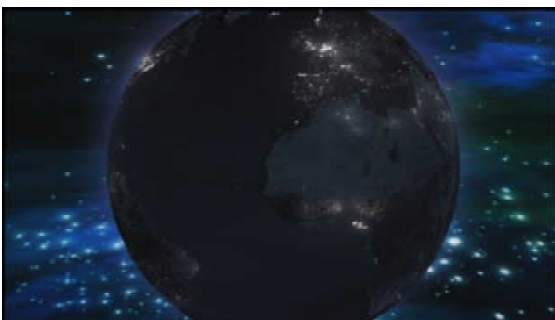
14.9-10<sup>9</sup>  
ans



Indifférents aux péripéties qui agitent leur surface, les continents poursuivent leurs transformations. Le temps que l'Afrique se fracture et déjà les mammifères ont pris mille apparences. C'est au pied de ces montagnes à peine nées que nos ancêtres font leurs premiers pas.

A la fin de leur prodigieux ballet tectonique, avec ses figures toujours renouvelées de déchirements et de rencontres, voilà finalement nos terres ...

15-10<sup>9</sup>  
ans



A présent, quand on suit la course de la nuit sur la planète, on voit des points lumineux qui s'allument un par un. Cela semble bien peu de chose dans l'immensité de l'Univers qui brille de tous ses feux... Et pourtant, cela représente une nouvelle étape de la matière : les hommes, dans leurs ténèbres, qui cherchent sans fin la lumière.

### 8.3 LE CIEL MULTI-LONGUEURS D'ONDE

Dans l'histoire de l'astronomie, notre point de vue a changé plus d'une fois : nous avons découvert que la terre n'était pas au centre du système solaire, que celui-ci était loin du coeur de la voie lactée, et que notre Galaxie n'avait aucune place particulière dans l'Univers.

Aujourd'hui, il faut à nouveau dépasser notre vision anthropocentrique : nous devons apprendre que nos yeux nous font connaître qu'une infime fraction du spectre électromagnétique. Outre la place insignifiante que nous occupons dans l'espace, et du temps limité qui nous est donné pour l'explorer, nous sommes limités dans une "cinquième dimension" : celle des couleurs.

La lumière visible n'est en fait qu'une infime partie du spectre électromagnétique. Nos yeux nous permettent de voir le monde dans une bande 0.38 à 0.7 μm; c.a.d environ une octave (doublement de fréquence).

Si on comparait cette octave de lumière (onde électromagnétique) avec une octave sonore (onde acoustique), un "piano de lumière" (Fig. 8.4) à sept octaves comprendrait les domaines de l'infrarouge proche à l'ultraviolet A,B&C - le domaine entre les ondes radio (bande FM) aux rayons gamma (hautes énergies) demanderait par contre plus de 50 octaves !

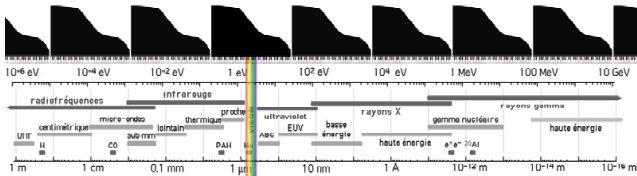


Fig. 8.4 : Nos yeux nous permettent de voir le monde dans une bande spectrale large d'environ une octave - entre le domaine radio (bande FM) et les rayons gamma des hautes énergies il y a plus de 50 octaves ...

Aujourd'hui, nous vivons un moment unique en astronomie: grâce aux développements instrumentaux de la deuxième moitié de ce siècle, de nouvelles fenêtres sur l'Univers ont pu être ouvertes : les domaines des ondes radio, du radar, de l'infrarouge, de l'ultraviolet, des rayons X et des rayons gamma sont pour la première fois accessibles à la curiosité des astrophysiciens.

#### La transparence de l'atmosphère

Transparente dans les domaines visible et radio, l'atmosphère constitue un obstacle infranchissable pour la lumière des autres domaines du spectre électromagnétique (Fig. 8.5). Ce n'est donc qu'avec l'essor des techniques spatiales (satellites, ballons stratosphériques) qu'une vision globale de notre Univers dans toutes les longueurs d'onde est devenue possible.

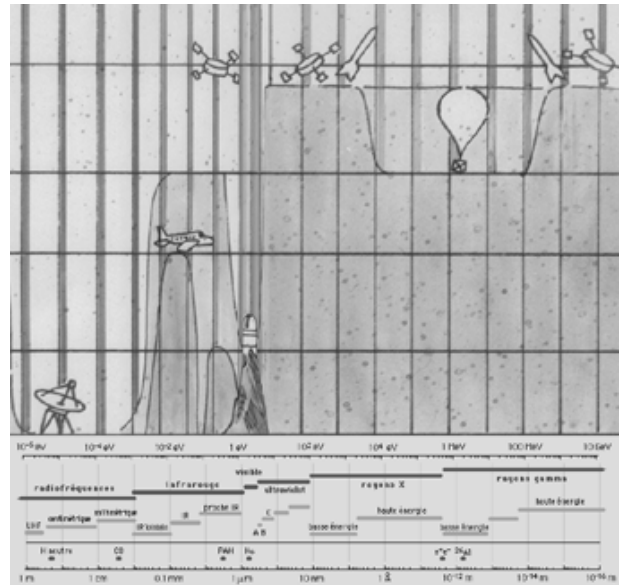


Fig. 8.5 : Tandis que les télescopes des domaines visible et radio peuvent nous permettre d'observer depuis la surface de la terre, il fallait attendre l'avènement des techniques spatiales pour observer les rayonnements IR, UV, X et gamma, qui ne traversent pas l'atmosphère terrestre : L'atmosphère absorbe, diffuse, déforme, rayonne - selon la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique.

#### la fenêtre du visible : explication élémentaire

De part et d'autre du visible, dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge, les oscillations des ondes de lumière mettent en résonance les atomes de l'eau et de l'air : les ultraviolets sont absorbés car leurs fréquences s'accordent aux vibrations des électrons dans les atomes, l'extinction de l'infrarouge est causé par la stimulation d'oscillations d'ions et molécule.

Un corps absorbe des fréquences proches des fréquences propres de ses constituants. Les oscillations sont forcées par le champ électrique de la lumière : il y a absorption de puissance, si la différence de phase  $\phi \neq 0$  ou  $\pi$ , c.a.d proche de la fréquence propre (résonance :  $\phi_r \approx \pi/2$ ) d'un oscillateur.

La résonance  $\omega_r$  dépend de la rigidité  $k$  du "ressort" et de la masse  $m$  de l'oscillateur

$$\omega_r = \sqrt{k/m} \quad 6.3$$

La rigidité du ressort  $k$  est la force de Coulomb  $F_c$  à la distance d'un rayon atomique  $r$

$$k = F_c / r \approx \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \quad 6.4$$

On trouve la longueur d'onde de la résonance

$$\lambda_r = 2\pi c / \sqrt{k/m} \quad 6.5$$

Les résonances typiques des électrons ( $m=m_e$  et  $r < 2.5 \text{ \AA}$ ) se situent à des fréquences dans l'UV,  $\nu_r \geq 6 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ ,  $\lambda_r \leq 470 \text{ nm}$ . Pour des distances  $r$  inférieurs on obtient des longueurs d'onde encore plus petites.

Les ions avec leur masse supérieure oscilleront a des fréquences plus basses, c.a.d. dans l'IR; pour  $m=m_p$  et  $r \geq 1 \text{ \AA}$ , on obtient  $\nu_r \leq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$ ,  $\lambda_r \geq 1.8 \text{ \mu m}$ . Pour des distances  $r$  supérieures la résonance sera encore plus loin dans l'IR.

La transparence de l'air, de l'eau et de plein d'autres substances (excepté p.e. les métaux avec leurs électrons libres), nous la devons a cette relative absence d'oscillations induites par la lumière; cet intervalle est caractérisé par le rapport des résonances des électrons et des ions, c.a.d. au moins  $\omega_e / \omega_p = \sqrt{m_p/m_e} = \sqrt{1840} \approx 43$ .

## Le langage des astres

C'est la découverte des raies atomiques dans le spectre du soleil par Fraunhofer qui a marqué le passage entre astronomie et astrophysique; depuis nous le savions : *Le langage des astres est celui des couleurs*. Aujourd'hui nous découvrons un sens encore plus large à ceci.

Pendant une grande partie de sa vie, une étoile du type solaire rayonne la plupart de son énergie sous forme de lumière visible - les photons du domaine visible sont donc avant tout les messagers de la photosphère des étoiles : grâce à l'astronomie visible, nous avons acquis la majorité de nos connaissances sur la vie des étoiles.

Par contre, en ce qui concerne l'étude de notre voie lactée, la lumière visible ne porte pas bien loin : l'absorption par les poussières est trop importante (voir ci-dessus). Depuis que l'analyse du rayonnement électromagnétique n'est plus réservé au seul domaine des photons visibles, nous voyons plus clair dans la Galaxie - la Voie Lactée se dévoile ... Mais à part la transparence de la Galaxie en radio, infrarouge ou pour les rayons gamma, les "nouvelles couleurs" devaient inévitablement apporter des découvertes surprenantes.

Décrypter le langage des couleurs dans leur intégralité représente donc un potentiel d'information immense. Dans les 16 cartes du ciel de la figure 8.8, la Galaxie est dévoilée chaque fois sous une nouvelle lumière - celle des ondes radio, radar, infrarouge, ultraviolet, rayons X et rayons gamma. Cet échantillon nous apprend que chaque fois qu'une nouvelle fenêtre spectrale est ouverte, nous avons trouvé de nouvelles facettes au ciel connu et, en plus, nous avons fait la découverte de phénomènes surprenants, souvent complètement inattendus, parfois même, nous avons trouvé de la nouvelle physique.

## Aspect des cartes célestes (projection AITOFF)

Les cartes construites par les astrophysiciens représentent l'ensemble de la sphère qui entoure notre planète. Ces cartes mettent à plat l'intérieur d'une sphère (Fig 8.6) - un peu comme la peau d'une orange (a) qu'on étale (b) ... puisqu'on veut que les coins supérieurs de chaque quartier se situent au même endroit (c), les quartiers extérieurs sont déformés. On obtient une carte en projection galactique, en couplant l'axe horizontal du repère avec le plan de la voie lactée.

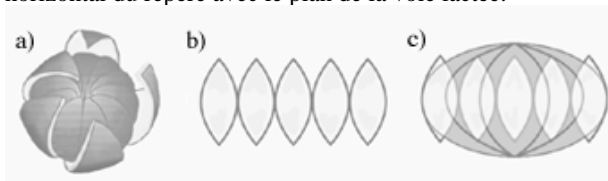


Fig. 8.6 Croquis expliquant la projection AITOFF du ciel entier

## "Fausses couleurs"

Pour percevoir les couleurs invisibles à l'oeil, nous transformons les intensités mesurées par les détecteurs du domaine radio, IR, X, ou  $\gamma$  en intensités de lumière visible (niveaux de gris dans ce polycopié) - ces cartes sont donc en "fausses couleurs".

## Repères

Pour mieux comprendre ces cartes et leur contexte (spatial et spectral), la figure 8.7 situe quelques régions célestes marquantes, et la figure 8.9 résume les gammes du rayonnement électromagnétique.

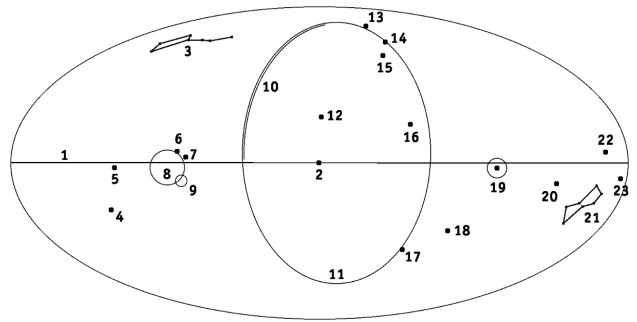


Fig. 8.7 Repères et régions célestes pour comparaison avec les Fig 8.8

1) Plan Galactique, 2) Centre Galactique; 3) constellation de la grande ourse; 4) galaxie spirale de l'Andromède; 5) Cas A, reste de supernova (SNR); 6) Cygnus A, radiogalaxie; 7) Cygnus X-1, binaire X (candidat trou noir); 8) superbulle du Cygne; 9) boucle du Cygne, SNR; 10) éperon galactique du nord, SNR (partie de la loop-1); 11) loop-1, SNR; 12) Sco X-1, binaire X; 13) Virgo A, quasar; 14) 3C273, quasar; 15) 3C279, quasar; 16) Cen A, galaxie active; 17) petit nuage de Magellan, galaxie; 18) grand nuage de Magellan; 19) pulsar et reste de supernova de la Vela; 20) Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel visible; 21) constellation d'Orion; 22) Geminga, pulsar; 23) pulsar et reste de supernova du Crabe.

---

### Le ciel radio

Les signaux détectés par les radiotélescopes témoignent du sillage d'électrons ultra-rapides dont la trajectoire est déviée par des champs magnétiques : le rayonnement (non-thermique) émis est appelé rayonnement synchrotron. Les sites d'émission dans notre Galaxie sont les restes de supernovae et les régions ionisées. Parmi les découverts extragalactiques, les "jets" des quasars sont des plus remarquables.

C'est grâce à la découverte des *pulsars* par un radiotélescope (Cambridge, 1967) que nous avons eu connaissance d'une nouvelle état de la matière : la matière neutronique.

---

### Le ciel de l'hydrogène atomique

Observé au radiotélescope VLA, le ciel à 21 cm révèle que l'espace entre les étoiles est loin d'être vide et sombre. A cette longueur d'onde, il dévoile la signature de l'hydrogène atomique, principale composante du gaz interstellaire.

L'analyse "Doppler" de la raie à 21 cm (résonance du spin de l'e- dans le H neutre), a permis de dresser la première cartographie "en volume" de la voie lactée.

---

### Le ciel des nuages moléculaires

Observé au télescope millimétrique de la Columbia University, dans la longueur d'onde du monoxyde de carbone (CO), le ciel dévoile de grandes structures de gaz dense et froid.

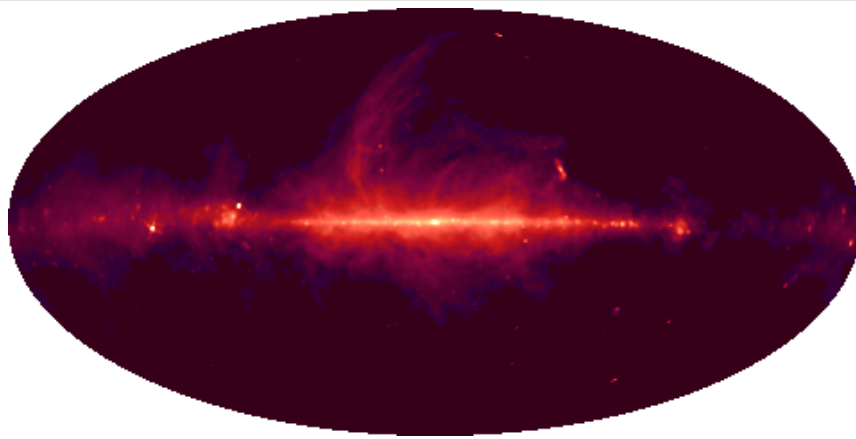
Ce sont les nuages moléculaires, au sein desquelles naissent les étoiles; ils sont concentrés dans un disque extrêmement plat à l'intérieur de la Voie Lactée.

---

### Le ciel millimétrique

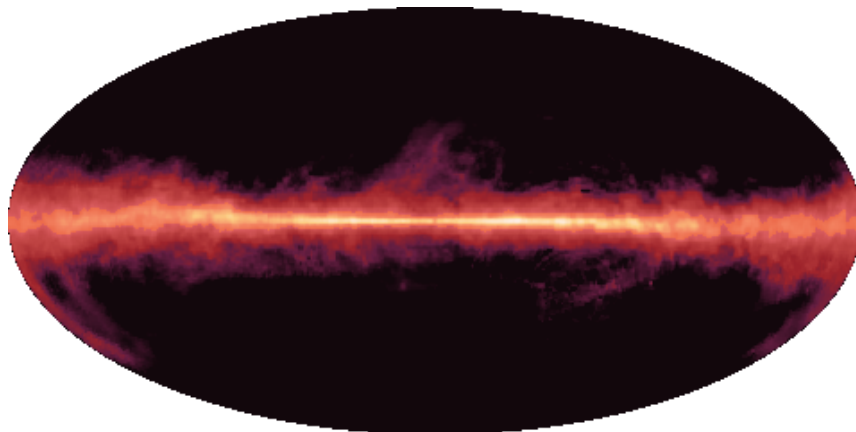
Observé au télescope DMR, à bord du satellite COBE, le ciel millimétrique dévoile l'émission des nuages d'électrons contenus dans la Voie Lactée.

En arrière plan, un rayonnement thermique parfaitement isotrope, d'une température de 3 K, révèle la trace du Big Bang. Superposées à ce corps noir à 3 K, d'infimes grumeaux témoignent de la formation des premières structures dans l'Univers.



$\lambda = 73 \text{ cm}$

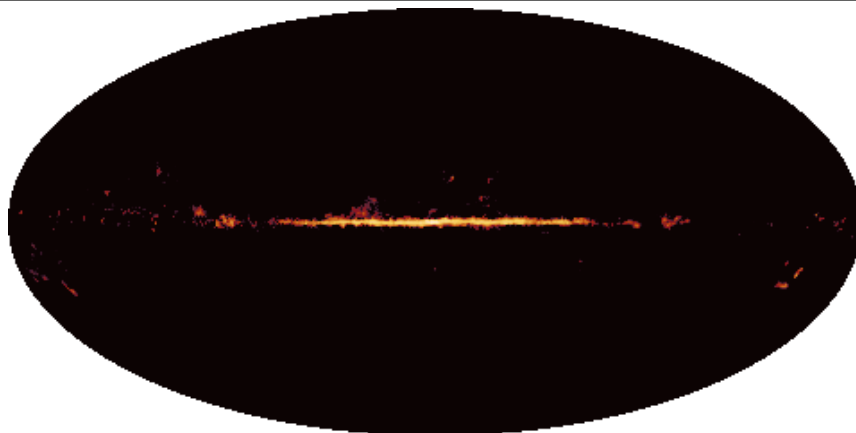
$E = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$



$\lambda = 21 \text{ cm}$

raie

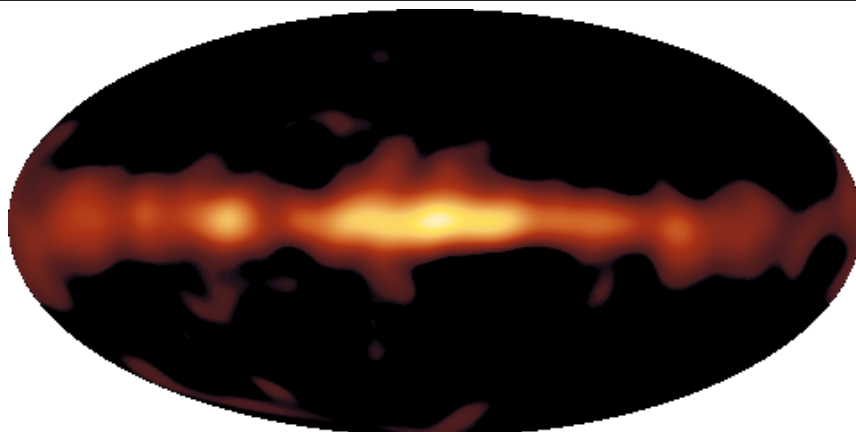
$E = 5.9 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$



$\lambda = 2.6 \text{ mm}$

raie

$E = 4.7 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$



$\lambda = 1.6 \text{ mm}$

$E = 7.7 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$

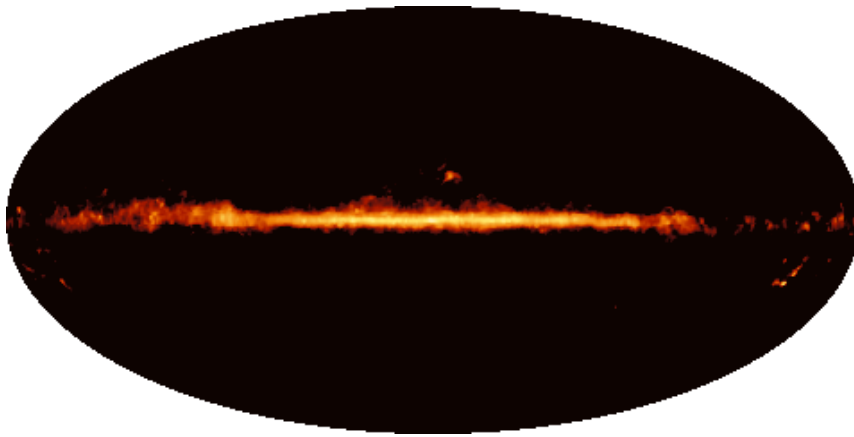
Fig. 8.8 a-d)

---

### Le ciel de l'infrarouge lointain

Observé par le télescope DIRBE, à bord du satellite COBE, le ciel de l'infrarouge lointain dévoile l'émission des poussières au sein de la Voie Lactée.

Ce sont ces mêmes nuages de poussières interstellaires, qui absorbent la lumière visible et nous font voir qu'une petite partie de notre Galaxie. Chauffées par la lumière visible et UV des étoiles avoisinantes, les poussières réémettent l'énergie reçue en IR - à la température du corps noir correspondant à leur température d'équilibre (ici env. 10 K).



$\lambda = 0.24 \text{ mm}$

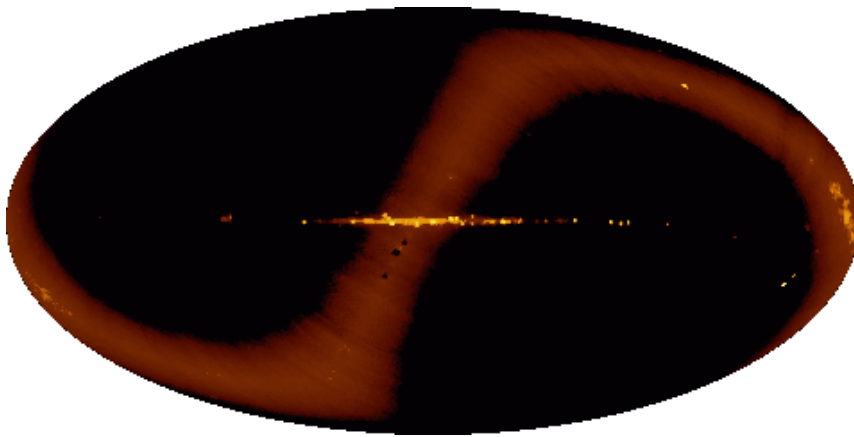
$E = 5.1 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$

---

### Le ciel infrarouge

Observé par le télescope DIRBE, à bord du satellite COBE, le ciel de l'infrarouge dévoile, à part notre voie lactée, un grand éclat lumineux, en forme de S sur cette projection, traversant toute la voûte céleste : la lumière zodiacale.

La lumière zodiacale résulte de la chaleur rayonnée par les poussières interplanétaires, comètes et astéroïdes qui sont à leur tour chauffés par le soleil (équilibre du rayonnement : un corps noir d'une  $T \approx 100 \text{ K}$  émet le maximum de son rayonnement à env.  $25 \mu$ )



$\lambda = 25 \mu$

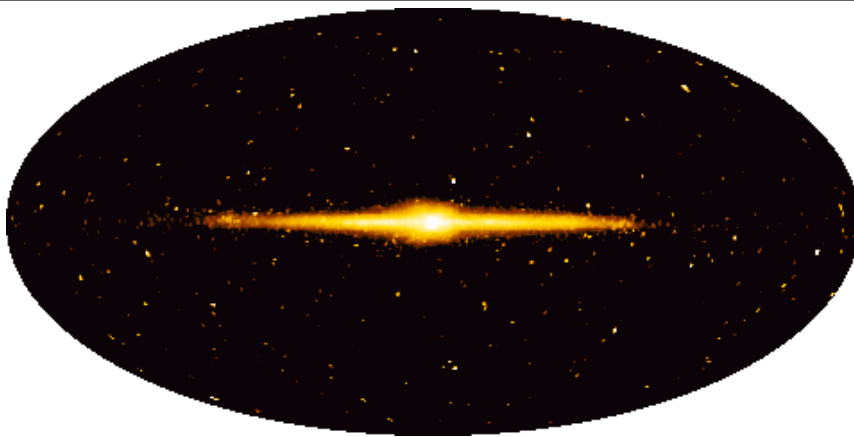
$E = 4.9 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$

---

### Le ciel de l'infrarouge proche

Observé par le télescope DIRBE, à bord du satellite COBE, le ciel de l'infrarouge proche révèle l'émission du disque et du bulbe de notre Galaxie.

Près de la partie centrale de la Voie Lactée, le disque s'épaissit en un bulbe, au sein duquel habite une majorité de vieilles étoiles, plus froides que le Soleil. Ces astres nés il y a plusieurs milliards d'années, ont été parmi les premiers engendrés par notre Galaxie.



$\lambda = 3.5 \mu$

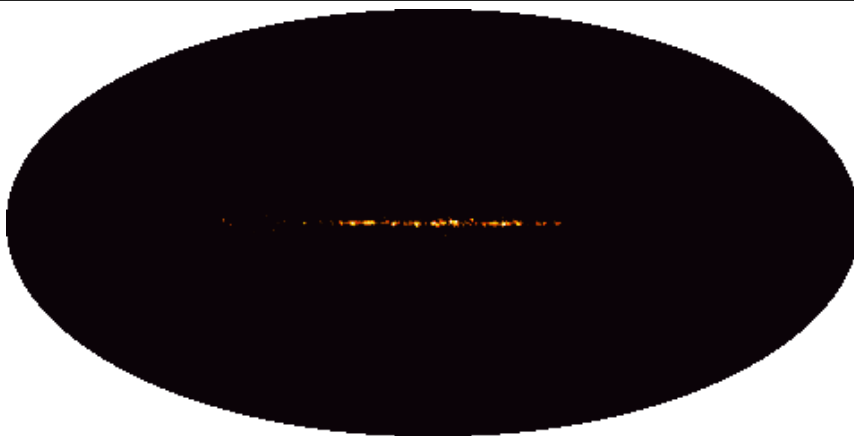
$E = 0.35 \text{ eV}$

---

### Le ciel des molécules organiques

Observé par le télescope AROME, embarqué à bord d'un ballon dans la stratosphère, le ciel révèle la présence de grandes molécules organiques dans notre Galaxie.

Le long du disque galactique, des étoiles riches en carbone ont permis la fabrication de molécules organiques par le gaz qu'elles ont éjecté dans le milieu interstellaire. Soumises aux effets des ultraviolets des étoiles avoisinantes, ces molécules "PAH" émettent des raies spectrales caractéristiques.



$\lambda = 3.3 \mu$

raie

$E = 0.37 \text{ eV}$

---

Fig. 8.8 e-h)

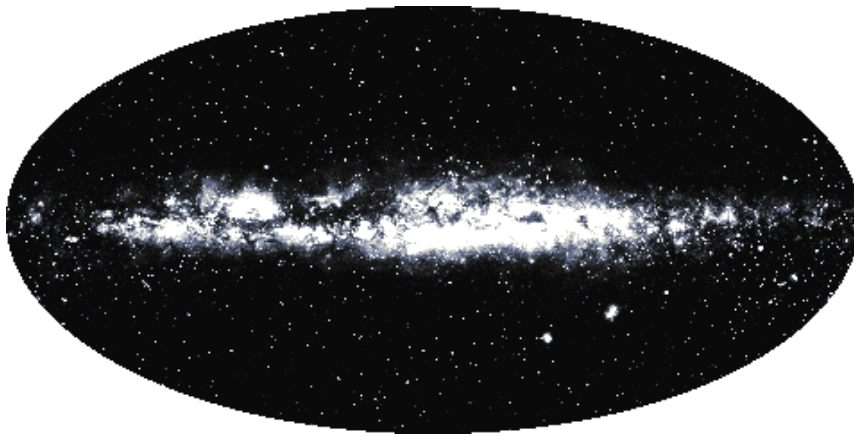
---

### Le ciel visible

Observé par les télescopes optiques, le ciel dans le domaine de perception de notre oeil, dévoile les myriades d'étoiles - la majorité confinées dans une longue traînée blanchâtre, que nous appelons la Voie Lactée.

La source d'énergie principale à l'origine de cette lumière visible est la fusion de l'hydrogène à l'intérieur des étoiles.

La lumière provenant des régions lointaines de la Voie Lactée, et particulièrement du centre galactique, est atténuée par la présence de nuages de poussières interstellaires.



$\lambda = 0.5 \mu$

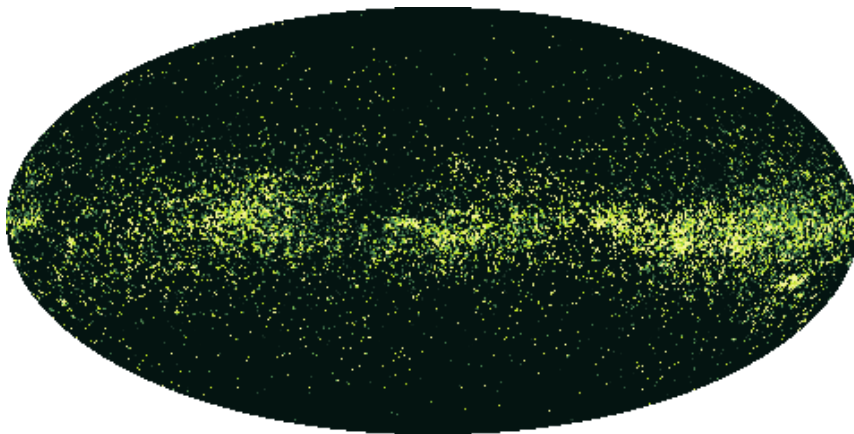
$E = 2.5 \text{ eV}$

---

### Le ciel ultraviolet

Dans ce ciel, observé par le satellite TD-1, ce sont les étoiles chaudes qui dominent. En raison de la forte extinction interstellaire en ultraviolet, il n'est pas possible de voir très loin dans notre Galaxie.

Les étoiles chaudes et proches dominent l'image - elles sont concentrées dans la ceinture de Gould, inclinée de  $19^\circ$  par rapport au plan Galactique. Le rayonnement UV révèle ainsi une région de formation récente d'étoiles proche du soleil.



$E = 8.2 \text{ eV}$

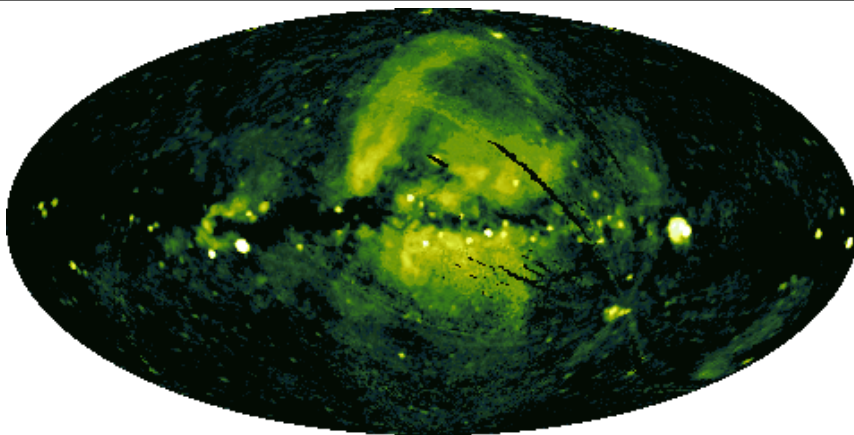
$\lambda = 0.15 \mu$

---

### Le ciel des rayons X (basses énergies)

Dans cette bande d'énergie, radiographiée par le satellite ROSAT, la Voie Lactée apparaît obscure: les nuages de gaz et de poussières absorbent ces rayonnements.

En premier plan, une énorme bulle de gaz extrêmement chaude révèle un passé violent au voisinage solaire : l'explosion d'une étoile. Témoins de la fin explosive qui frappe les étoiles massives, les restes de supernovae sont de gigantesques bulles de gaz en expansion (trouvez les bulles dans Vela et le Cygne)



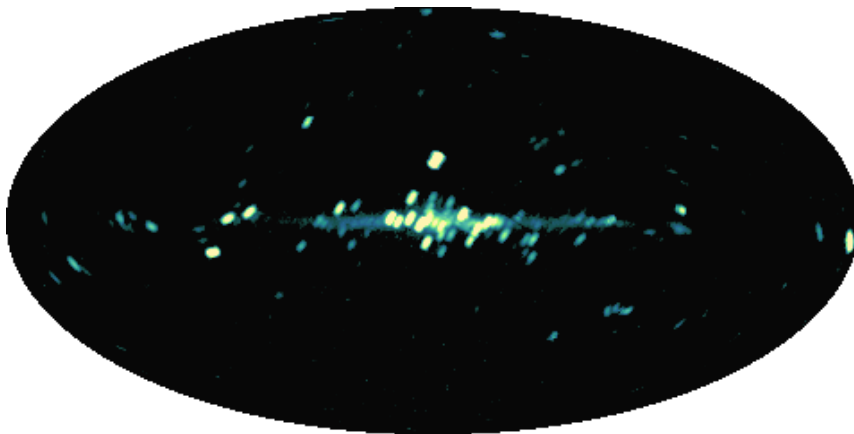
$E = 750 \text{ eV}$

$\lambda = 1.6 \text{ nm}$

---

### Le ciel des rayons X (hautes énergies)

Observé par le satellite HEAO 1, le ciel des rayons X-durs révèle un grand nombre de sources compactes, violentes et imprévisibles: les binaires X. Un système binaire contient deux étoiles qui gravitent autour d'un centre commun. La chute de matière qui s'effectue depuis une étoile normale sur un compagnon compact, libère de l'énergie sous forme de rayons X. Les compagnons compacts sont des naines blanches, étoiles à neutrons, ou trous noirs - la binaire X Cygnus X-1 était en fait une première évidence expérimentale pour l'existence de trous noirs.



$E = 30 \text{ keV}$

$\lambda = 0.4 \text{ \AA}$

---

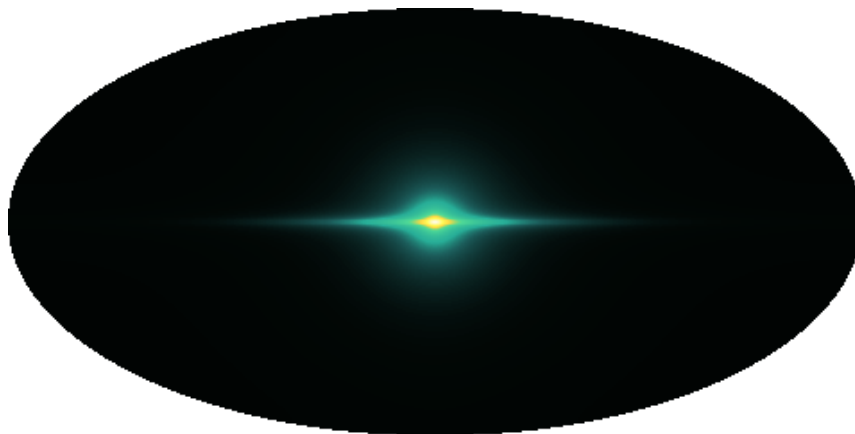
Fig. 8.8 i-l)

---

### Le ciel de l'antimatière

Le ciel observé par le télescope OSSE, à bord du satellite GRO, dévoile l'existence d'antimatière dans la Galaxie : des anti-électrons que l'on appelle des positrons. Lorsqu'ils rencontrent des électrons, ils s'annihilent au profit de ce rayonnement gamma spécifique.

Le long du disque galactique, la désintégration des éléments radioactifs (voir carte  $^{26}\text{Al}$ ) doit être la source principale des positrons; dans le bulbe galactique les étoiles à neutrons ou trous noirs sont de possibles candidats pour la production des positrons.



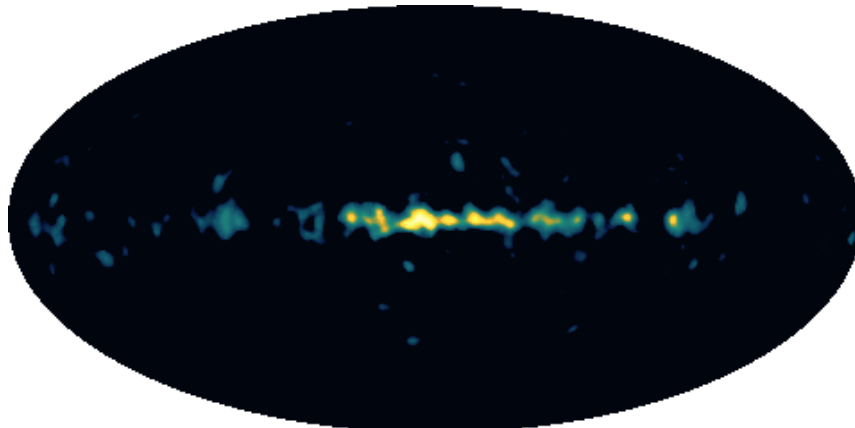
E= 511 keV raie (modèle basé sur les données de GRO/OSSE)  $\lambda = 2.4 \cdot 10^{-12}$  m

---

### Le ciel radioactif

Par la cartographie d'une raie gamma-nucléaire à 1.8 MeV, le télescope GRO-COMPTEL, a établi la présence d'aluminium radioactif ( $^{26}\text{Al}$ ) dans notre Galaxie. Il se répartit principalement le long du disque galactique où s'agglutinent les étoiles.

L' $^{26}\text{Al}$  se transforme en magnésium au bout d'un million d'années environ - un temps relativement court en astrophysique. Sa présence dévoile donc les sites où des éléments ont été synthétisés récemment. L'observation la raie à 1.8 MeV est une preuve directe de la production d'éléments lourds dans l'Univers.



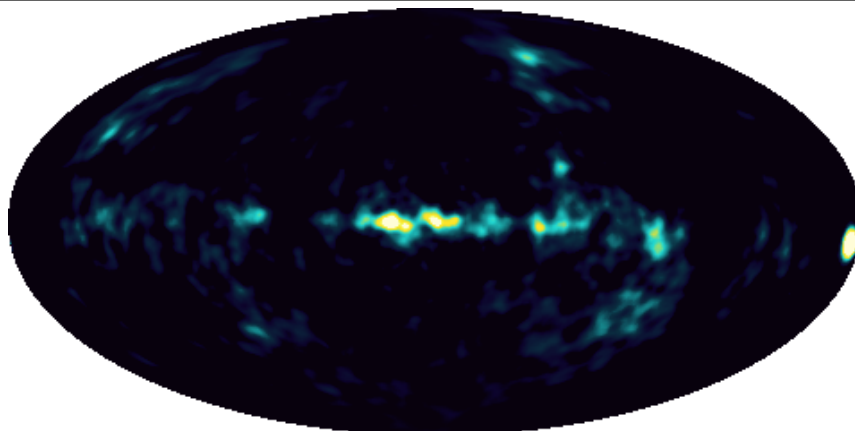
E= 1.8 MeV raie  $\lambda = 6.8 \cdot 10^{-13}$  m

---

### Le ciel des rayons $\gamma$ (basses énergies)

Le ciel observé par le télescope COMPTEL, à bord du satellite GRO, révèle la trace de collisions entre des électrons du rayonnement cosmique. Une émission diffuse est produite dans le gaz interstellaire qui est continuellement soumis aux impacts des électrons qui sillonnent la Galaxie à des vitesses proches de celle de la lumière.

Un phénomène totalement inattendu se superpose à cette image : les sursauts gamma. Le ciel  $\gamma$  se révèle être un gigantesque feu d'artifice dominé par des bouffées d'énergies colossales (durée  $\sim$  sec, direction :  $4\pi$ /hasard, fréquence  $\sim$  1/jour, origine énigmatique).



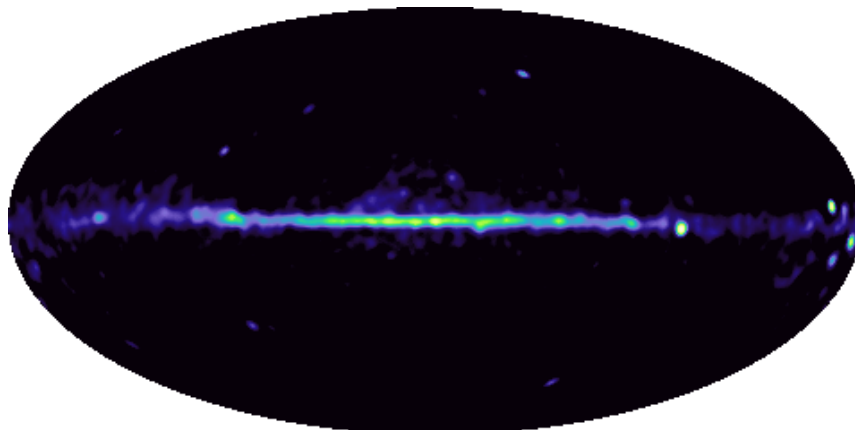
E= 5.5 MeV  $\lambda = 2.3 \cdot 10^{-13}$  m

---

### Le ciel des rayons $\gamma$ (hautes énergies)

Le ciel observé par le télescope EGRET, à bord du satellite GRO, révèle la trace de phénomènes extrêmement violents. Cette lumière  $\gamma$  témoigne des collisions entre rayonnement cosmique - noyaux d'atomes qui sillonnent la Galaxie à des vitesses ultrarapides (principalement des protons) - et le gaz interstellaire froid et dense du milieu interstellaire.

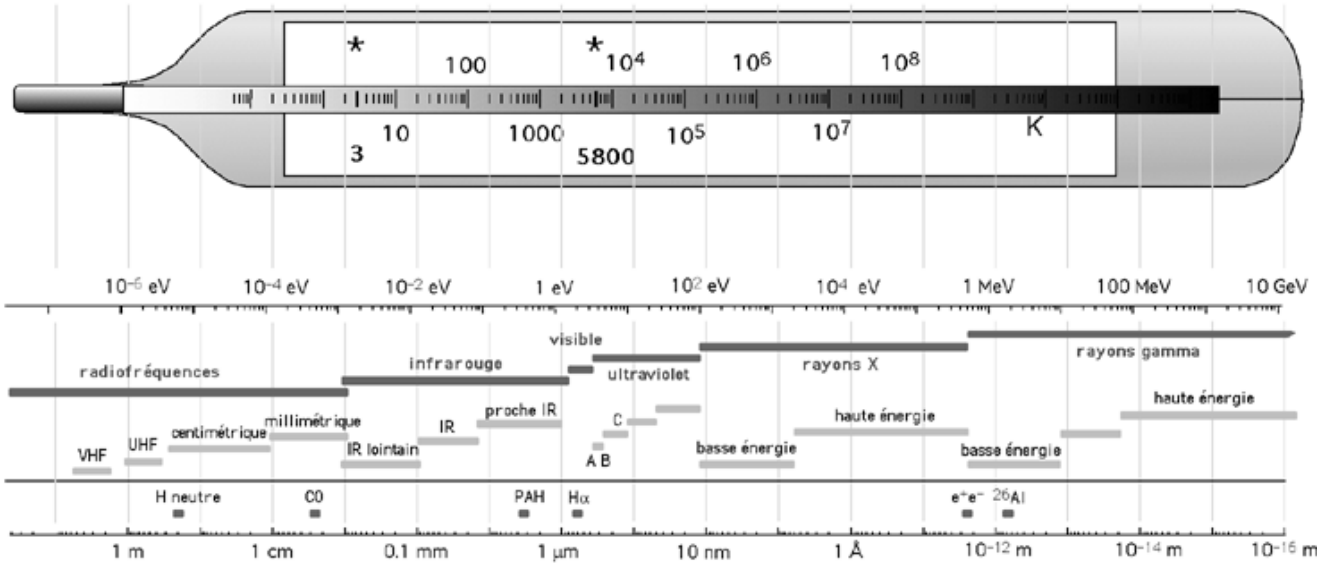
Certains pulsars montrent une émission gamma intense (p.e. le pulsar de la Vela est l'objet le plus brillant du ciel) - ce sont donc des accélérateurs de particules puissants.



E > 100 MeV  $\lambda = 1.2 \cdot 10^{-14}$  m

Fig. 8.8 m-p)

maximum d'émission d'un corps noir



les domaines spectroscopiques

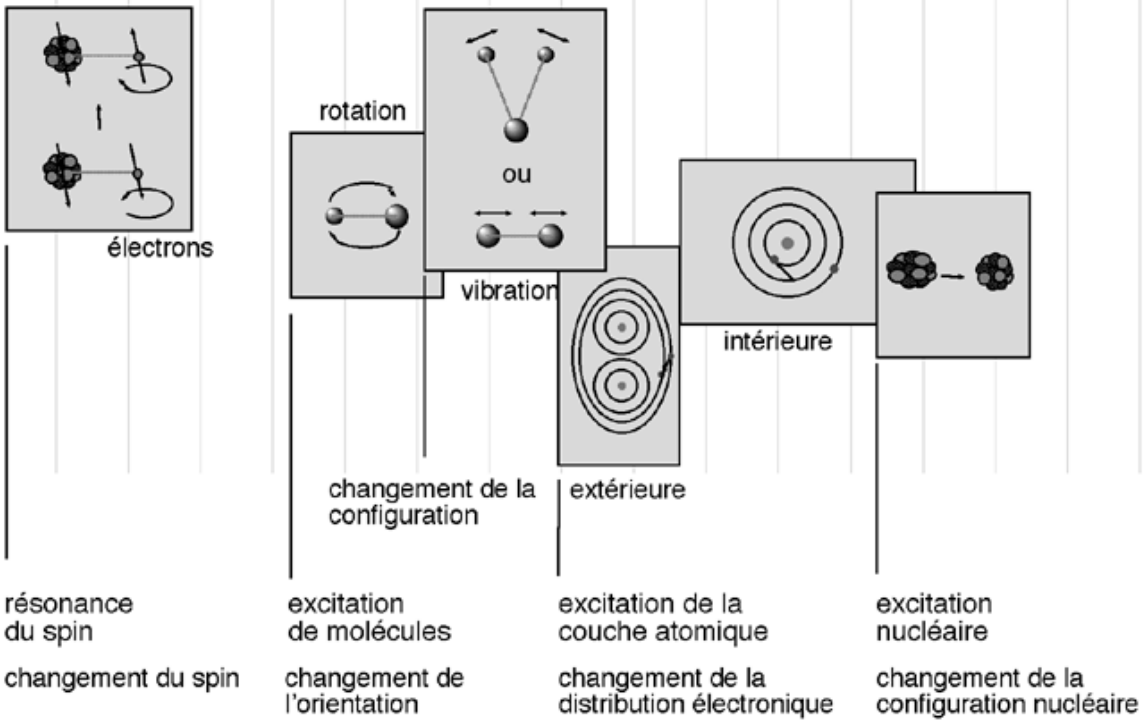


Fig. 6.9 : Les gammes du rayonnement électromagnétique